

NDVI vegetációs index előállítása távérzékelte AVHRR és MODIS adatok alapján

A doktori értekezés tézisei

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar

Földtudományi Doktori Iskola

Iskolavezető: *Dr. Gábris Gyula*, egyetemi tanár

Földrajz-Meteorológia Program

Programvezető: *Dr. Nemes-Nagy József*, egyetemi tanár



Készítette:

Kern Anikó

Témavezető:

Dr. Bartholy Judit

Tanszékvezető egyetemi tanár
az MTA doktora

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2011

Bevezetés, a munka célkitűzései

Műholdas távérzékeléssel nyert multispektrális adatokból számos meteorológiai, klimatológiai, levegőkörnyezeti, geofizikai, biológiai, ökológiai, agronómiai és környezetvédelmi információ is kinyerhető. Megjelenésük óta ezen adatok jelentősége folyamatosan nőtt, és a származtatott információ napjainkra már nélkülözhetetlenné vált.

A szárazföldi növényzet állapotának és mennyiségének leírására a műholdas sugárzásmérő műszerek csatornáit által mért mennyiségek kombinálásával különböző vegetációs indexeket hoztak létre, melyek közül az egyik legismertebb a Továbbfejlesztett Nagyfelbontású Sugárzásmérő (AVHRR) adataiból előállított Normalizált Vegetációs Index (NDVI). Ezek az NDVI adatsorok további (pl. időjárással, éghajlattal, növényfenológiával kapcsolatos) vizsgálatokra alkalmasak (*Kern et al., 2007a*). Az AVHRR/NDVI vegetációs indexet optimális esetben a műholdas szenzor által mért, de légköri korrekción átesett sugárzási adatokból célszerű előállítani. A légköri korrekció magában foglalja a légkör sugárzásmódosító hatásainak a leválasztását. Kivitelezésére számos eljárás létezik, melyek különböző, a légkörre jellemző információt igényelnek. Tekintve, hogy az amerikai Nemzeti Légügyi és Űrhajózási Hivatal (NASA) nagyfelbontású multispektrális Közepes Felbontású Leképező Spektrális Sugárzásmérő (MODIS) adatai a légköri korrekcióhoz szükséges meteorológiai mennyiségek becslésére elvileg alkalmasak, ezért munkám során célul tűztem ki az ELTE TTK műholdvevő állomása által vett AVHRR és MODIS adatok együttes használatát. Ennek értelmében az AVHRR adatok légköri korrekcióját más adatforrásoktól függetlenül, pusztán az elérhető MODIS adatokból származtatott meteorológiai mennyiségek alapján végzem el, és ily módon származtatok NDVI értékeket Magyarország térségére.

Felhasznált adatok és alkalmazott módszerek

Munkám alapjául az ELTE TTK műholdvevő állomása által vett AVHRR és MODIS adatok szolgálnak (*Timár et al., 2006; 2008*), melyek meteorológiai műholdak fedélzetén elhelyezett sugárzásmérők. Az AVHRR adatok feldolgozásához saját készítésű programokat, míg a MODIS adatokból származtatott (a NASA ún. 5-ös szintű összegyűjtésének megfelelő) meteorológiai produktumok előállításához különböző publikusan elérhető szoftvereket használtam, melyeket a NASA szakemberei fejlesztenek a hivatalos MODIS produktumok előállítása érdekében. Az NDVI értékek előállításához két különböző fizikai jelenség leírására készült modellt adaptáltam. A légkör sugárzásmódosító hatásainak leválasztására légköri korrekciós, míg a mért reflektanciák irányfüggőségének csökkentése (vagyis normalizálása) érdekében egy kétirányú reflektancia eloszlás-függvény modellt (BRDF) adaptáltam. Munkám során célul tűztem ki, hogy az AVHRR

adatok légköri korrekcióját más adatforrásoktól (például numerikus időjárás előrejelző modellek eredményeitől) függetlenül, pusztán az elérhető MODIS adatok alapján végeztem el. Ennek értelmében a légköri korrekcióhoz szükséges négy meteorológiai változó (aeroszol optikai mélység 550 nm-en, teljes kihullható vízgőzmennyiség, vertikálisan integrált ózonnemesség és felszíni légnyomás) mindegyikét MODIS adatokból határoztam meg. Azokban az esetekben, amikor az AVHRR adatokhoz MODIS adat nem érhető el, több éves saját származtatású vagy publikus adatsorokból meghatározott havi illetve éves átlagokat használtam fel. A származtatott szabálytalan rácsú meteorológiai mezőket többszöri újramintavételezéssel és bilineáris interpolációval képeztem le minden egyes NOAA áthaladásból készített AVHRR kivágat saját rácsára, mely származtatott mezőkkel az adaptált légköri korrekciót alkalmazni tudtam. Megvizsgáltam a származtatott MODIS alapú meteorológiai mezők megbízhatóságát, minőségét, hogy ezzel véleményt alkothassak a felhasznált légköri korrekciós modell alkalmazhatóságáról. A korrekciós algoritmusok alapján számított NDVI mezőket alapos minőségellenőrzésnek vettem alá, majd az adatsor alkalmazására bemutattam egy esettanulmányt.

Eredmények

Munkám legfontosabb eredményeit az alábbiakban foglalom össze.

1. Hazánkban elsőként alkalmaztam MODIS adatokat a NOAA/AVHRR adatok légköri korrekciójához.
2. A légköri korrekció kivitelezéséhez komplex, sok lépéssel magába foglaló adatfeldolgozó rendszert hoztam létre a sajátvételező nyers AVHRR és MODIS adatok feldolgozására. MODIS adatok esetén a kiépített rendszer teljesen automatikus, mely a nyers adatok fogadásától, feldolgozástól (és archiválástól) kezdve valós idejű meteorológiai produktumok származtatásán át numerikus előrejelző modellbe való asszimilálásig dolgozza fel az adatokat, a legfrissebb és legkorszerűbb hivatalos NASA szoftverekkel (*Kern et al., 2008d; 2009; 2010a; 2010b*).
3. Elvégeztem a nyílt forráskódú Egyszerűsített Légköri Korrekciós Modell (SMAC) adaptálását és érzékenységi analízisét egy, a legkisebb négyzetek módszerén alapuló linearizálást felhasználó, *Monte Carlo* alapú szimulációs módszerrel. Relatív érzékenységi vizsgálataim rámutattak arra, hogy a légköri korrekcióhoz szükséges négy meteorológiai mező közül legfontosabb az aeroszol optikai mélység (550 nm-en), ezt követi a vertikálisan integrált vízgőz, azután a vertikálisan integrált ózon, és végül a felszíni légnyomás.
4. A légköri korrekció számára szükséges négy meteorológiai változót MODIS adatokból előállítottam, majd a legfontosabb hármat és azok pontosságát részletesen megvizsgáltam. A

következőkben részletezett eredmények egyértelműen alátámasztják azok használhatóságát, mely így a NOAA/AVHRR adatok légköri korrigálását függetlenné teszi más, az aktuális időpontra vonatkozó adatforrásoktól.

4.1. Az 550 nm-re vonatkozó aeroszol optikai mélység (AOD) változékonyságát két év, összesen 306 Terra/Aqua áthaladás MODIS adatából számszerűsítettem Magyarország területére. Az átlagos területi átlag $\sim 0,17$ -nek, a területi változékonyság pedig $\sim 0,23$ -nak adódott. Előbbi közel áll a 0,2 értékű kontinentális átlagértékhez, azonban ez az érték ipari vagy természetes jelenségek hatására jelentősen módosulhat (*Kern és Bartholy, 2006; Timár és Kern, 2007*). A napi változékonyságot jellemző napi abszolút maximum és minimum AOD értékek különbségére $\sim 0,41$ -et, míg Budapest átlagos AOD értékéül $\sim 0,3$ -at kaptam. Meghatároztam továbbá az átlagos AOD mezőt $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ -os térbeli felbontásban a Kárpát-medence tág térségére mind a 2007-es és mind a 2008-as adatok alapján, mely reprezentatív eredménynek tekinthető hazánk AOD klimatológiájáról a vizsgált években. A kapott eredmények alapján erősen javasolt az elérhető legjobb, az aktuális időponthoz tartozó AOD értékek használata, melyre a MODIS adatok jelenleg az egyik legjobb forrásnak számítanak.

4.2. Minden évszakot átölölő, 152 darab Terra és Aqua áthaladás MODIS adatiból két különböző (infravörös, IR; és közeli infravörös, NIR) módszerrel származtatott vertikálisan integrált vízgőz (IWV) mennyiségeket összevettem rádiószondás felszálásokból eredő, illetve az Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ (ECMWF) numerikus időjárás előrejelző modell analízis és rövidtávú IWV előrejelzési értékeivel a Kárpát-medence térségére. A 124 derült nap 356 rádiószondás felszálásából származó IWV-hez viszonyítva a MODIS NIR IWV-re erősebb kapcsolatot, ugyanakkor nagyobb negatív átlagos eltérést (alulbecslést) kaptam, mint a MODIS IR IWV esetén (*Kern et al., 2007b; 2008c*). A rádiószondás adatok nappali száraz alulbecslését figyelembe véve azonban a MODIS NIR IWV-vel összevetve már kisebb átlagos eltérés adódik, mint a MODIS IR IWV esetén, mely alapján MODIS NIR IWV jobb minőségűnek mondható. Bár a rádiószondás IWV értékeket különböző időpontokra vonatkozó ECMWF analízis és előrejelzési mezők értékével összevetve jobb eredményt kaptam, azonban a különbség a légköri korrekcióhoz való felhasználáshoz mérten nem jelentős. Az IWV napi menetét vizsgálva (amely befolyásolhatja az eltérő időpontokban áthaladó műholdak adatainak kombinálását) a korábbi publikációkkal hasonló nagyságrendű IWV növekedési rátát kaptam a délelőtti órákban a NIR IWV ($0,54 \text{ mm h}^{-1}$) és az ECMWF előrejelzési ($0,21 \text{ mm h}^{-1}$) adatok alapján, míg az IR IWV és ECMWF analízis adatok

alapján jóval kisebb értékek adódtak (rendre $-0,02$ és $0,025 \text{ mm h}^{-1}$). Eme eredmények alapján jogosan használható mind a MODIS NIR, mind az IR I WV az AVHRR adatok légköri korrekciójához, azonban a finomabb térbeli felbontás és az időbeli változékonyság jobb visszaadása miatt inkább a MODIS NIR I WV használata javasolt.

- 4.3. A 2007-es MODIS adatokból származtatott vertikálisan integrált ózonértékeket és az ózonomérés legkorszerűbb műholdas eszközének – az Aura fedélzetén található Ózon Monitorozó Szenzor (OMI) – adatait verifikáltam földfelszíni megfigyelésekkel, a Budapesten található Brewer spektrofotométer méréseivel (Borbás *et al.*, 2010). Eredményül a MODIS mérések időpontjára interpolált felszíni és a MODIS ózonadatok közötti összefüggésre gyengébb kapcsolatot kaptam, mint OMI ózonadatokkal összevetve, azonban ez a különbség a légköri korrekcióban betöltött hatás szempontjából elenyésző, ami alátámasztja a MODIS ózonértékek használatát. Az időközben elkészült új, ún. C6-os algoritmussal (főleg az Aqua/MODIS adatok esetén) még jobb eredményeket kaptam (Borbás *et al.*, 2010). Verifikációs eredményeim hozzájárultak a MOD07 „Légköri Profilok” elnevezésű új, C6-os hivatalos NASA algoritmusának továbbfejlesztéséhez és elméleti leírásához is (Borbás *et al.*, 2011).
5. Az AVHRR látható és közeli infravörös csatornáit által mért reflektanciák irányfüggőségének csökkentése érdekében adaptált BRDF modell alkalmazásához létrehoztam egy új, gyeppek szempontjából feljavított (kategóriák száma alapján pedig a BRDF logikája által megkövetelt egyszerűsített, 4 kategóriás) felszínborítottsági adatbázist. A munka során a kiindulási hivatalos MODIS felszínborítottsági adatbázist (MOD12) javítottam fel az ún. Corine *Land Cover* 2000 adatbázissal.
6. MODIS adatokra támaszkodva korrigáltam a SMAC modellel, majd az adaptált BRDF-modellel a NOAA-16, -17, és -18 áthaladásainak AVHRR 1-es és 2-es csatornáinak mért reflektancia adataiból álló, a Kárpát-medencét magába foglaló 153 műholdkép-kivágotat 2007-re. A légköri korrekción és irányfüggőségi normalizáción átesett, már a felszínre vonatkozó reflektancia-értékekből NDVI mezőket származtattam. A felhasznált 153 áthaladás alapján számszerűsítettem a MODIS alapú légköri korrekció és a BRDF normalizáció NDVI értékekre gyakorolt átlagos módosító hatását (mely rendre $0,197$ -nek, illetve $0,0046$ -nek adódott). Az alternatív módon (más forrású meteorológiai mezőekkel) előállított NDVI értékek átlagosan alig térnek el az eredeti módon (csak MODIS adatokkal) korrigált NDVI értékektől. Ezzel egyfajta becslést adtam a származtatott mennyiségek adatforrás-választásból fakadó bizonytalanságára. A BRDF-modell felszín típusra vonatkozó érzékenysége alapján elmondható, hogy az NDVI értékek módosulásának mértéke a helytelen

- felszín típus figyelembevételével látszólag nem túl nagy, azonban a szélsőértékek esetén nagyságrendjük összemérhető a BRDF-modell hatásának abszolút értékével.
7. Meghatároztam az NDVI időbeli menetében jelenlevő bizonytalansági tényezőket, és megemlítettem a bizonytalanság csökkentésére szolgáló különböző módszereket. Ide tartozik a diszkrét *wavelet* transzformáció is, amellyel zajszűrést és interpolációt végeztem az eredeti, zajjal terhelt adatsoron (*Kern et al., 2008b; Barzga et al., 2009; Tóth et al., 2010*).
 8. A származtatott NDVI értékeket átmintavételeztem különböző felbontású szabályos rácsokra, és részleteztem ezek előnyeit és hátrányait. $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ -os rácsfelbontás esetén különböző szempontok alapján vizsgáltam a származtatott NDVI adatok értékeit, elsősorban az NDVI adatok bizonytalanságának meghatározása érdekében. Az azonos napra eső, különböző NOAA műholdak átrácsozott adatait egymással összevetve a legerősebb kapcsolatot a NOAA-17 és -18 adatai esetén, míg a leggyengébbet a NOAA-16 és -17 adatai esetén kaptam. Ez alapján, és a NOAA-16/AVHRR adataira vonatkozó egyéb (a dolgozatban részletezett) problémák miatt a 2007-es évre nem javasolt az ELTE műholdnevű állomása által vett NOAA-16/AVHRR adatainak használata. A $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ felbontású rácson az azonos napra eső, különböző műholdak méréseiből származó átrácsozott NDVI értékek kapcsolata alapján az átlagos eltérés 0,009. A meghatározott bizonytalanság így $\sim 0,01$ értékűnek mondható, és ez az érték felhasználható az NDVI értékeken alapuló további vizsgálatokban.
 9. Kísérletet tettem a sajátvételi, származtatott AVHRR/NDVI adatok verifikálására, melyhez a NASA hivatalos MOD13 produktumának 16 napos ún. kompozit NDVI értékeit használtam fel. A vizsgálat elvégzéséhez szem előtt tartottam, hogy (1) a MODIS adatokból származtatott MOD13 NDVI értékek sem jelenthetnek abszolút referenciát, (2) teljes egyezés a két szenzor (MODIS és AVHRR) adataiból származtatott NDVI értékei között nem is állhat elő a szenzorok eltérő csatornái, azok eltérő spektrális válaszfüggvényei és az eltérő képpont-lefedettség miatt. A verifikálást egyrészt néhány kiválasztott homogén területre bemutatott időbeli menetekben keresztül szemléltettem. Ezen kívül a 2007-es év minden egyes 16 napos kompozit NDVI mezeje esetén megvizsgáltam az azonos napról és helyről eredő MOD13 és AVHRR NDVI értékek közötti kapcsolatot, melyre átlagosan -0,01 és 0,005 átlagos eltérést kaptam rendre az Aqua/MODIS és a Terra/MODIS MOD13 NDVI adatokkal való összevetéskor. A teljesség kedvéért megvizsgáltam a Terra/MODIS és az Aqua/MODIS MOD13 NDVI adatai közötti kapcsolatot is, melyre az $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ felbontású MOD13 NDVI adatok esetén 0,009 értékű átlagos eltérést kaptam. A kapott 0,009-es átlagos eltérés – mint az $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ felbontású MOD13 NDVI értékek bizonytalansága – szinte pontosan

megegyezik a különböző NOAA műholdak AVHRR szenzorainak adataiból meghatározott, $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ szabályos rácsú NDVI értékek bizonytalanságával. Eredményeim alapján a jobb megvilágítási körülmények és a jobb földrajzi azonosítási lehetőségek miatt mindig javasolt a „fiatalabb” műholdak – jelen esetben a NOAA-17 és -18 – AVHRR adatainak használata, szemben a régebbiekkel, pl. NOAA-16-tal.

10. A származtatott AVHRR/NDVI adatok felhasználásával megvizsgáltam a 2007 júliusában a Kárpát-medencét sújtó hőhullám vegetációra gyakorolt hatását. Az NDVI értékekre meghatározott bizonytalanságok ellenére egyértelműen kimutatható volt a hőhullám hatása a kiválasztott homogén vegetációjú, erdős, vagy (nem a hőhullám előtt learatott) mezőgazdasági területekre, ahol a hőhullám hatása a közelítőleg napi felbontású adatokból szinte napról-napra követhető. A vizsgált területek átlagos AVHRR/NDVI csökkenésére a 9 napos periódus alatt $\sim 0,053$ értéket kaptam. Megvizsgáltam a hőhullám hatását MOD13 NDVI adatok alapján is (*Kern et al., 2008a*), és kimutattam, hogy a 16 napos kompozitképek a rövid időskálájú jelenségek tanulmányozására kevésbé használhatók. Az időjárási esemény felhívja a figyelmet arra is, hogy függetlenül az éves csapadékmennyiségtől, egy erős nyári hőhullám jelentősen károsíthatja a még be nem takarított termény jelentős részét.

Következtetések

A fenti eredmények egyértelműen alátámasztják a nagy múltú AVHRR szenzor adatainak hasznosságát. A saját vételű műholdas adatok időbeli felbontása, illetve a vegetációs indexek származtatási körülményeinek alapos ismerete jelentős értéket képvisel, amely jelen esetben azt eredményezi, hogy a korszerű MODIS szenzor adataiból a NASA által előállított NDVI adatsorokhoz képest előnyt élvezhetnek a saját származtatású AVHRR/NDVI mezők. A származtatott NDVI mezők bizonytalanságának számszerűsítésével tovább növeltem az adatok hasznosíthatóságát, és hozzáadott értékkel gazdagítottam az adatokat. A munka alapján elmondható, hogy érdemes behatóbban tanulmányozni a különböző műholdas szenzorok adatainak együttes használatát a bennük rejlő információ jobb hasznosítása érdekében.

Az értekezés témájában készített publikációk

- Barcza, Z., Kern, A., Haszpra, L., Kljun, N., 2009. Spatial representativeness of a tall tower eddy covariance measurement based on remote sensing and footprint analysis. *Agr. Forest Meteorol.*, 149, 795-807. doi:10.1016/j.agrformet.2008.10.021
- Borbás, E.É., Seemann, S.W., Kern, A., Moy, L.A., Tóth, Z., Menzel, W.P., 2010. The MODIS MOD07 Collection 6 products. (Poszter) 2010 AGU Fall Meeting, 13-17 December, San Francisco, California, USA.
- Borbás, E.É., Seemann, S.W., Kern, A., Moy, L., Li, J., Gumley, L., Menzel, W.P., 2011. MODIS Atmospheric Profile retrieval - Algorithm Theoretical Basis Document, Collection-6, Vers. 7. (Internet elérhetőség: http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/_docs/MOD07_atbd_v7_April2011.pdf)
- Kern, A., Bartholy, J., 2006. A Terra/Aqua MODIS adatokból származtatott aeroszol optikai mélység és hatása a légköri korrekcióra (Extended abstract). *VIII. Magyar Aeroszol Konferencia*, 2006 május 25-26, Siófok-Szabadifürdő. A VIII. Magyar Aeroszol Konferencia programjai és előadáskivonatai. (Szerk.: Salma I.) ISBN: 963 463 8589.
- Kern, A., Barcza, Z., Bartholy, J., Pongrácz, R., Fassang, Á., 2007a. NDVI adatsorok klimatikus vizsgálatai a Kárpát-medencére. "Klíma-21 *füzetek*", *Klimaváltozás-Hatások-Válaszok*, 49, 26-37.
- Kern, A., Barcza, Z., Borbás, E., Bartholy, J., Ferencz, Cs., 2007b. Integrated water vapor estimations in Hungary (Poszter). *Earth from Space*, 2007, 3rd International Conference. Moscow, Russia, 4-6 December, 2007.
- Kern, A., Barcza, Z., Bartholy, J., Pongrácz, R., Timár, G., Ferencz, Cs., 2008a. Analysis of MODIS NDVI time series for Hungary in 2007: detecting the phenological impacts of the summer heatwave. *Geophys. Res. Abstracts*, Vol. 10, 05083. General Assembly of the European Geophysical Union. Vienna, Austria, 13-18 April, 2008. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-05083
- Kern, A., Barcza, Z., Timár, G., Bartholy, J., 2008b. NDVI vegetációs index idősorok vizsgálata wavelet transzformáció segítségével. (Abstract) VIII. Magyar Biometria és Biomatematikai Konferencia, Budapest, 2008. július 1-2., 29.o.
- Kern, A., Bartholy, J., Borbás, E.É., Barcza, Z., Pongrácz, R., Ferencz, Cs., 2008c. Estimation of vertically integrated water vapor in Hungary using MODIS imagery. *Adv. Space Res.*, 41, 1933-1945. doi:10.1016/j.asr.2007.06.048
- Kern, A., Bartholy, J., Pongrácz, R., Dezső, Zs., Barcza, Z., 2008d. Polar orbiting satellite receiving station at the Eötvös Löránd University, Hungary. (Extended abstract) In: 8th Conference on meteorology, climatology and atmospheric physics, COMECAP 2006 - Proceedings. Volume C. (ed.: A.Chronopoulou-Sereli), 111-118.
- Kern, A., Bartholy, J., Ferencz, Cs., 2009. MODIS adatok vétele és feldolgozása az ELTE-n. Előadás. *35. Meteorológiai Tudományos Napok*. Budapest, 2009. november 19-20.
- Kern, A., Barcza, Z., Kovács, R., Ferencz, Cs., Bartholy, J., 2010a. Real-time processing of Direct Broadcast MODIS data in Hungary (Poszter). *17th International TOVS Study Conference (ITSC-17)*. 2010 April 14-21, Monterey, California, USA. (Best Poster Award)
- Kern, A., Barcza, Z., Kovács, R., Ferencz, Cs., Bartholy, J., 2010b. Közvetlen vételi MODIS adatok valós idejű feldolgozása. (Poszter) *HUNGEO-2010*, Szombathely, 2010, augusztus 14-19.
- Timár, G., Ferencz, Cs., Lichtenberger, J., Kern, A., Molnár, G., Székely, B., Pásztor, Sz., 2006. MODIS-adatvétel az ELTE műholdvevő állomásán. *Geodézia és Kartográfia*, 58, 11-14. ISSN 0016-7118

- Timár, G., Kern, A., 2007. Sivatagi porcsóvák és porjelenségek a Földközi-tenger felett – űrfelvételek az ELTE műholdvevő állomásáról. *Földrajzi Közlemények*, 55, 361-370. ISSN 0015-5411.
- Timár, G., Székely, B., Molnár, G., Ferencz, Cs., Kern, A., Galambos, C., Gercsák, G., Zentai, L., 2008. Combination of historical maps and satellite images of the Banat region – re-appearance of an old wetland area. *Global Planet. Change*, 62, 29-38. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.11.002
- Tóth, E., Barcza, Z., Birkás, M., Gelybó, Gy., Zsembeli, J., Bottlik, L., Davis, K. J., Haszpra, L., Kern, A., Kljun, N., Koós, S., Kovács, Gy., Stingli, A., Farkas, Cs., 2010: Measurements and estimations of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases – Arable lands. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Ed.: Haszpra, L.). Springer, Dordrecht - Heidelberg - London - New York, pp. 157-197. ISBN 978-90-481-9949-5, e-ISBN 978-90-481-9950-1, doi: 10.1007/978-90-481-9950-1